



⑮ BUNDESREPUBLIK
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES
PATENTAMT

⑫ Patentschrift
⑩ DE 42 09 227 C 1

⑤① Int. Cl.⁵:
B 22 D 27/04
C 30 B 17/00

⑳ Aktenzeichen: P 42 09 227.2-24
㉑ Anmeldetag: 21. 3. 92
㉒ Offenlegungstag: —
㉓ Veröffentlichungstag
der Patenterteilung: 8. 5. 93

DE 42 09 227 C 1

Innerhalb von 3 Monaten nach Veröffentlichung der Erteilung kann Einspruch erhoben werden

㉔ Patentinhaber:
Access e.V., 5100 Aachen, DE

㉕ Vertreter:
Schickedanz, W., Dipl.-Ing., Pat.-Anw., 8050
Offenbach

㉖ Erfinder:
Sahm, Peter R., Prof. Dr.-Ing., 5100 Aachen, DE;
Schädlich-Stubenrauch, Jürgen, Dr.-Ing., Vaals, NL;
Stanescu, Joan, Dipl.-Ing., 6350 Bad Nauheim, DE

㉗ Für die Beurteilung der Patentfähigkeit
in Betracht gezogene Druckschriften:

DE-PS 26 09 949
DE-AS 20 11 254
DE-AS 17 83 103
DE 39 19 920 A1
DE 37 16 145 A1
DE-OS 21 19 019
US 40 57 097

Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 5, Grund- u.
Werkstoffe, Nr. 147, 1988, VDI-Verlag;
DE-Z.: Ingenieur-Werkstoffe, 2, 1990, 10, S.64-85;
DE-Z.: Metallwissenschaft und Technik, 35, 1981, 12,
S. 1235-1239;

㉘ Verfahren und Vorrichtung zur Herstellung von Bauteilen aus Superlegierungen

㉙ Die Erfindung betrifft ein Verfahren und eine Vorrichtung
für die Herstellung einkristalliner Bauteile aus Superlegie-
rungen. Hierbei wird die Legierungsschmelze durch Unter-
kühlung in einen metastabilen Zustand gebracht. An einer
bestimmten Stelle der unterkühlten Schmelze wird sodann
eine Keimbildung inkliniert. Mit Hilfe eines Selektors wird von
der Keimstelle ausgehend ein Einkristall in die eigentliche
Formschale des Bauteils überführt.

DE 42 09 227 C 1

DE 42 09 227 C1

1

Beschreibung

Die Erfindung betrifft ein Verfahren und eine Vorrichtung zur Herstellung von Bauteilen aus Superlegierungen.

Für die Herstellung hochbeanspruchter Bauteile, z. B. Turbinenschaufeln oder künstlichen Hüftgelenken, werden bevorzugt Superlegierungen auf einer Nickel- oder Kobalt-Basis verwendet. Diese Superlegierungen weisen eine hohe Temperaturfestigkeit und Korrosionsbeständigkeit auf. Außerdem besitzen sie einen relativ großen Elastizitätsmodul. Damit diese positiven Eigenschaften der Superlegierungen in Erscheinung treten, müssen ihre Schmelzen auf eine bestimmte Weise erstarrten und ein möglichst einkristallines Gefüge bilden. Die Art der Erstarrung ist dabei in der Regel die sogenannte gerichtete Erstarrung, bei welcher die Erstarrung aufgrund eines vorgegebenen Temperaturgradienten entlang einer Raumkoordinate fortschreitet.

Die gerichtete Erstarrung wird in der Regel mit einer Vorrichtung erreicht, die eine mit einer Legierung gefüllte Gießform aufweist, die von einer Induktionsspule umgeben ist, welche die Legierung durch induktive Erwärmung auf eine bestimmte Temperatur bringt, während auf der Unterseite der Gießform eine Kühlplatte vorgesehen ist (DE-A 39 19 920). Zwischen der Aufheizzone und der Kühlzone ist ein sogenanntes "baffle" vorgesehen, das eine thermische Isolierung darstellt. Nachteilig ist hierbei, daß die Wärme nur über den bereits erstarrten Teil der Schmelze abgeführt wird. Mit zunehmender Länge der erstarrten Zone sinkt jedoch die Abkühlrate, so daß nur durch aufwendige Maßnahmen, z. B. durch getrennt steuerbare Ofenheizelemente, ein weitgehend gleichmäßiger Wärmefluß während der Abkühlungsphase möglich ist.

Es ist indessen auch ein Verfahren zur Herstellung eines Gußstücks aus in einer Richtung erstarrten Metalllegierung bekannt, bei dem eine Legierung progressiv in einer Gießform abgekühlt und ein in einer Richtung parallel zu einer gegebenen Richtung der Legierungsmasse verlaufendes Temperaturgefälle aufrechterhalten wird (DE-B 26 09 949). Hierbei wird die Gesamtheit der Legierung zunächst in ein metastabiles Unterkühlungsgleichgewicht in Form einer homogenen Flüssigkeit gebracht und dann das Unterkühlungsgleichgewicht aufgehoben, wodurch die Erstarrung der Legierung in Form eines Körpers mit einer dendritischen Kristallisationsstruktur hervorgerufen wird mit Dendriten, deren Hauptachse parallel zur Richtung des Temperaturgefälles verlaufen.

Ein ähnliches Gießverfahren mit schlagartiger gerichteter Erstarrung ist aus der US-PS 40 57 097 bekannt. Die schlagartige Erstarrung der unterkühlten flüssigen Legierung wird hierbei durch Zerstörung des metastabilen Gleichgewichts der unterkühlten Schmelze bewirkt, beispielsweise indem an der Stelle mit der niedrigsten Temperatur ein mechanischer Schock ausgelöst wird.

Bei diesem Verfahren der autonomen Erstarrung, bei denen aus thermisch unterkühlten Superlegierungsschmelzen ein orientiertes dendritisches Gefüge ohne gerichtete Erstarrung hergestellt werden kann, wird anstelle eines erzwungenen Kristallwachstums ein freies Wachstum ermöglicht, so daß die Wärme nicht nur über das erstarrte Material, sondern aus der unterkühlten Schmelze abgeführt werden kann (B. Lux, G. Haour, F. Mollard: Dynamic undercooling of Superalloys, METALL, Heft 12, 1981, S. 1235—1239). Der Grundgedanke besteht dabei darin, zuerst eine regelmäßige Anord-

2

nung oder Gruppierung von ausgerichteten Dendriten in einer unterkühlten Schmelze zu erzeugen und dann auf dieser die übrige Schmelze aufwachsen zu lassen. Wie Untersuchungen gezeigt haben, weist das nach diesem Verfahren hergestellte Material kein einkristallines Gefüge auf, sondern Körner unterschiedlicher Größe.

Diese Erscheinung wird dadurch erklärt, daß zu Beginn der Erstarrung mehrere Kristallisationszentren vorhanden waren. Während der Rekaleszenz einer noch unterkühlten Schmelze, d. h. wenn sie sich im Bereich des Temperaturanstiegs befindet, entwickelt sich sehr schnell ein feines dendritisches Netzwerk, das die gesamte Schmelze durchzieht. Das in dieser Phase entstandene Dendritennetzwerk, das aus Dendritenachsen und Sekundärdendritenarmen besteht, bestimmt mit einer Orientierung bereits die Mikrostruktur des gesamten Bauteils oder Werkstücks. Nach der Rekaleszenz erstarrt die Restschmelze in den interdendritischen Räumen bei einer geringeren Unterkühlung. Tertiärdendriten wachsen in die verbleibenden Bereiche der Restschmelze. Durch die relativ langsamen Abkühlgeschwindigkeiten während dieser Phase kann sich das bei der Rekaleszenz entstandene Gefüge infolge ablaufender Wachstums- und Reifungsprozesse, der sog. Ostwald-Reifung, vergrößern.

Schließlich ist auch noch eine Vorrichtung für die Herstellung einer Superlegierung auf Nickel-Basis mittels der autonomen gerichteten Erstarrung bekannt, bei der ein induktiv aufgeheizter Graphitsuszeptor als Wärmequelle für die zu unterkühlende Legierung dient (INGENIEUR-WERKSTOFFE, 1990, Nr. 10, S. 64, 65). Dieser Suszeptor weist eine innere Ausnehmung auf und ist außen von einem Tiegel umgeben, der seinerseits von einem Metallgehäuse umgeben ist, das auf seiner Außenseite wassergekühlte Mittelfrequenz-Induktionsspulen trägt. In der inneren Ausnehmung des Suszeptors ist ein Tiegel angeordnet, in dem sich die Legierungsschmelze befindet.

Der Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, ein Verfahren und eine Vorrichtung für die Herstellung einer Legierung mittels der autonomen gerichteten Erstarrung zu schaffen, mit dem es möglich ist, auch größere Werkstücke, z. B. Turbinenschaufeln, vollständig aus einkristallinem Gefüge herzustellen.

Diese Aufgabe wird gemäß den Merkmalen der Patentansprüche 1 und 12 gelöst.

Der mit der Erfindung erzielte Vorteil besteht insbesondere darin, daß einerseits das sehr kostengünstige und schnelle Verfahren der autonomen gerichteten Erstarrung Anwendung findet und andererseits die Nachteile dieses Verfahrens, d. h. die relativ grobe oder polykristalline Struktur des Gefüges, vermieden wird, wodurch auch die Korngrenzen verschwinden. Mit Hilfe der Erfindung ist es möglich, einkristalline Turbinenschaufeln aus einer unterkühlten Schmelze reproduzierbar herzustellen. Durch einen einfachen Stift kann die Erstarrung mechanisch initiiert werden. Um die Einkristallinität zu gewährleisten, wird ein Selektor verwendet. Besonders vorteilhaft ist auch die Verwendung einer Gießform, die wenigstens auf ihrer Innenseite aus Al_2O_3 und B_2O_3 besteht. Für den Einsatz der Erfindung sind Legierungen besonders geeignet, die nur geringe Gehalte an karbid-, oxid- oder nitridbildenden Elementen und geringe Gehalte an B, C, Zr aufweisen; z. B. sollte deren C-Gehalt $< 0,009\%$ sein.

Ein Ausführungsbeispiel der Erfindung ist in der Zeichnung dargestellt und wird im folgenden näher beschrieben. Es zeigen:

DE 42 09 227 C1

3

Fig. 1 eine Gießform für ein Werkstück, wobei die in der Gießform befindliche Legierung nach dem erfindungsgemäßen Verfahren abgekühlt wird;

Fig. 2 eine Abkühlkurve für eine Legierung;

Fig. 3 eine Gießform entsprechend Fig. 1, deren Inhalt statt mit einer Induktionsspule mit einer Widerstandsheizung aufgeheizt wird;

Fig. 4 zwei Gießformen im Traubenaufbau.

In der Fig. 1 ist eine Formschale oder Gießform 1 gezeigt, in der sich eine flüssige Metall-Legierung 2 befindet. Diese Metall-Legierung 2 wird vorzugsweise außerhalb der Formschale 1 verflüssigt und dann in die Formschale 2 eingegossen. Die Temperatur der verflüssigten Metall-Legierung beträgt hierbei z. B. 1500°C. Findet der Schmelzvorgang außerhalb der Gießform 1 statt, so wird eine Behandlung der Schmelze vorgenommen, die es ermöglicht, eine keimarme Schmelze in die Gießform einfließen zu lassen. Die Formschale 1 ist in ihrem mittleren Bereich 20 so ausgebildet, daß ihre inneren Konturen den äußeren Konturen eines zu gießenden Werkstücks entsprechen. In der Fig. 1 sind die Konturen eines speziellen Werkstücks nicht zu erkennen, weil die Formschale 1 stark schematisiert dargestellt ist. Im oberen Bereich 21 weist sie einen inneren Kranz 3 auf, der ein Filter 4 trägt, mit dem große Verunreinigungen abgefangen werden, z. B. Keramikpartikel oder Schlackenpartikel aus dem Schmelzriegel. Um die Formschale 1 herum ist ein Graphit-Suszeptor 5 angeordnet, der seinerseits von einer Metallhülle 6 umgeben ist, die eine wassergekühlte Induktionsspule 7 trägt. Die Spule 7 kann hierbei z. B. oben dichter gewickelt sein als unten. Eine direkte induktive Aufheizung der Schmelze erfolgt mit der Anordnung gemäß Fig. 1 nicht, weil durch die hierbei auftretende Rückwirkung der Temperaturgradient der im mittleren Bereich befindlichen Schmelze 14 zerstört würde, weshalb der Graphit-Suszeptor für die induktive Aufheizung gewählt wird.

Die Formschale 1 sitzt mit dem Boden 10 ihres unteren Bereichs 26 auf einem Isolierblock 8 auf, der auf dem Boden 9 der Metallhülle 6 angeordnet ist. In diesem Isolierblock befinden sich gut wärmeleitende Kühlblöcke 22, 23, durch die Kühlrohre 24, 25 geführt sind, in denen Kühlwasser fließt. Der untere Bereich 26 der Formschale 1 ist als eigenständiger Behälter von flüssiger Schmelze 16 ausgebildet, der nur über einen Selektor 17 mit dem mittleren Bereich 20 in Verbindung steht. Dieser Selektor 17 ist helixförmig ausgebildet und hat einen inneren Durchmesser von 2 bis 10 mm. Außer einem helixförmigen Selektor könnte auch ein anderer bekannter Selektor Verwendung finden (vgl. hierzu F. J. Feikus: "Technologie der einkristallinen Erstarrung hochchromhaltiger Nickelbasissuperlegierungen", Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 5: Grund- und Werkstoffe, Nr. 147, 1988).

Der Abstand d zwischen dem Boden des Behälters 26 und der Oberkante der Kühlblöcke 22, 23 legt weitgehend den Abkühlereffekt fest. Durch den Boden 9 des Isolierblocks 8 und den Boden 10 der Formschale 1 führt eine Öffnung 11, durch die ein Stift 12 geführt ist. Dieser Stift 12 dient zur Auslösung eines Kristallisationsvorgangs. Dieser Vorgang kann jedoch ohne Stift ausgelöst werden. Allerdings ist dann die Erstarrung nicht exakt bei einer definierten Unterkühlung zu starten, sondern sie beginnt von selbst, wenn die durch das System Formschale/Legierung vorgegebene maximale Unterkühlung erreicht ist.

Es sei angenommen, daß mit der Formschale 1 eine Turbinenschaufel hergestellt werden soll, die aus der

4

Superlegierung CMSX6 besteht, die folgende Zusammensetzung aufweist:

Ni	— 70,3 Gew.-%
Cr	— 9,8 Gew.-%
Al	— 4,85 Gew.-%
Ti	— 4,7 Gew.-%
Ta	— 2,1 Gew.-%
Fe	— 0,5 Gew.-%
Mo	— 2,8 Gew.-%
Co	— 5,2 Gew.-%
Hf	— 0,01 Gew.-%
Mn	< 0,01 Gew.-%
C	< 0,006 Gew.-%
S	< 0,05 Gew.-%
N	10 ppm
O	9 ppm

Wenigstens die Innenwand der Formschale, die mit der Schmelze 2, 14, 16 in Berührung kommt, besteht hierbei aus einer Mischung aus Al_2O_3 und B_2O_3 . Hierdurch wird die Schmelze weitgehend keimfrei gehalten.

Mit Hilfe der Induktionsspule 7, die mit einer mittelfrequenten Wechselspannung betrieben wird, wird das Material 14 in der Formschale 1 auf ca. 1500°C aufgeheizt. Das Wechselfeld der Induktionsspule 7 durchdringt dabei die Metallhülle 6, die aus einem nichtmagnetischen Metall besteht und gelangt zu dem Graphit-Suszeptor 5, den es induktiv erwärmt. Die von dem Suszeptor 5 abgestrahlte Wärme bringt die Legierung in der Formschale 1 dabei auf die erwähnte Temperatur von 1500°C. Ist diese Temperatur erreicht, d. h. ist das Legierungsmaterial 14 überall flüssig, wird die Stromzufuhr zu der Induktionsspule 7 unterbrochen, worauf sich der Graphit-Suszeptor 5 allmählich abkühlt. Die Abkühlung erfolgt sehr langsam. Die Festlegung der Stelle der größten Unterkühlung erfolgt vorzugsweise durch das Zusammenwirken mehrerer Maßnahmen, beispielsweise indem die Induktionsspule 7 unterschiedliche Wicklungen aufweist und/oder indem der Temperaturgradient durch getrennt gesteuerte Widerstandselemente eingestellt wird und/oder indem die Dicke der Isolation zwischen Schmelze und Isolierblock 8, der mittels Wasser gekühlt werden kann, auf einen bestimmten Wert festgelegt wird. Prinzipiell kann die Unterkühlung durch Nichtheizen als auch durch kontrolliertes Abkühlen realisiert werden. Die Einstellung eines Temperaturgradienten in Längsrichtung kann auch nach dem Sulzer-Verfahren erfolgen, d. h. es kann in eine auf 1500°C vorgeheizte Formschale gegossen und dann das System auf geeignete Weise isoliert werden. Für die Einstellung eines hohen Gradienten nur im Ankeim- bzw. Selektorbereich wird eine gleichmäßig hohe Unterkühlung oberhalb der Nukleationstemperatur im Schaufelbereich erzeugt, und zwar bei gleichzeitiger Einstellung eines Temperaturgradienten im Ankeim- oder Helixbereich, um so ein lokales Unterschreiten der Keimbildungstemperatur zu erreichen. Hat das Legierungsmaterial 14 eine bestimmte Temperatur erreicht, wird mit dem Stift 12 in den unteren Bereich 16 des Legierungsmaterials 14, wo die größte Abkühlung auftritt, gestochen, um eine Keimbildung künstlich zu initiieren. Die Spitze 13 des Stifts 12 dringt hierbei nur wenig in den Bereich 16 ein. Um diese Spitze herum bilden sich Kristalle, die nach oben wandern und zu einem Selektor 17 gelangen, der die Form einer Schraubenwindung aufweist. Durch

DE 42 09 227 C1

5

diesen Selektor 17 wird von mehreren Kristallkörnern nur eines ausgewählt. Der ausgewählte Einkristall wächst nun in den oberen Bereich des Legierungsmaterials 14 hinein und füllt schließlich die ganze Formschale 1 aus. Statt mittels des Einstechens des Stifts 12 in die Schmelze kann die Keimbildung auch durch andere Methoden erreicht werden, z. B. durch eine gezielte Erschütterung der Schmelze an der Stelle der Ankeimung oder durch Unterkühlen bis zur maximal möglichen Unterkühlung ohne Einwirkung durch Fremdkeime oder durch Erschütterungen bzw. durch schlagartige Erhöhung der Abkühlgeschwindigkeit. Ein Ankeimen ist zwar erwünscht, aber nicht in jedem Fall erforderlich. Ist die Temperatur entlang der vertikalen Achse der Formschale nicht konstant, so kann auf das Ankeimen verzichtet werden. Dagegen ist ein Ankeimen erforderlich, wenn die Temperatur entlang der vertikalen Achse überall gleich ist, d. h. der Temperaturgradient Null ist. Wenngleich auch ohne Temperaturgradient gearbeitet werden kann, wird er dennoch bevorzugt eingesetzt und durch eine nichtlineare Verteilung der Spulenwindungen oder durch unterschiedlich starke Abkühlung von Widerstandsheizern etc. erzeugt.

In der Fig. 2 ist der Temperaturverlauf in der Schmelze in Abhängigkeit von der Zeit bei einem bevorzugten Ausführungsbeispiel dargestellt. Man erkennt hierbei, daß die Temperatur in den ersten 500 Sekunden von etwa 1380°C auf 1310°C fällt. Dabei werden zuerst die Liquidus-Temperatur TLIQ und dann die Solidus-Temperatur TSOL unterschritten. Beim Erreichen der Temperatur T_L setzt die Rekaleszenz ein, d. h. die Temperatur steigt wieder bis zu einem Betrag T_w an, um hierauf wieder abzufallen. Der Bereich T_L—T_w charakterisiert somit die Rekaleszenzphase I. Die Postrekaleszenzphase II wird durch den Bereich T_w—T_{sol} gekennzeichnet. Die in der Fig. 2 dargestellte Unterkühlung läuft in der Regel so ab, daß das Schmelzgut nach dem Aufschmelzen eine definierte Zeit mit einer definierten Temperatur überhitzt wird. Nach Beendigung der Erstarrung kann die Probe wieder aufgeheizt werden und damit ein neuer Zyklus beginnen.

Wie vorstehend beschrieben, werden bei dem erfindungsgemäßen Verfahren zur Herstellung einkristalliner Bauteile Schmelzen bis zu einer Temperatur unterkühlt, bei der es möglich ist, die für eine Legierung bestimmter Zusammensetzung spezifische Erstarrungswärme unter anderem in die unterkühlte Schmelze abfließen zu lassen, und zwar derart, daß sich die normalerweise dendritenartig wachsenden Kristalle, beginnend am Ort der Keimbildung, so weit ausbreiten, daß die ersten Dendritenspitzen das andere Ende des herzustellenden Bauteils erreicht haben, ohne daß ein der einkristallinen Ausbildung entgegenwirkendes Wiederaufschmelzen — bedingt durch die Abgabe der Erstarrungswärme in der Schmelze — stattfindet.

Um zu erreichen, daß die nach oben wandernde Dendritenspitze vor einem durch die Abgabe der Erstarrungswärme der Schmelze auftretenden Wiederaufschmelzen den größtmöglichen Abstand vor der Keimstelle erreicht hat, wird eine größtmögliche Unterkühlung eingestellt. Das Wiederaufschmelzen tritt nur in der Postrekaleszenzphase auf; d. h. je größer die Unterkühlung ist, desto geringer fällt die Postrekaleszenzphase aus. Dadurch wird das Wiederaufschmelzen auf ein Minimum reduziert.

Der Selektor 17, der im Windungsbereich eine Dicke von 3 bis 10 mm aufweist, dient für die Auswahl eines einzelnen zum Einkristall sich auszubildenden Kristalli-

6

ten, wobei er dem Keimbildungspunkt an der Spitze des Stifts 12 vorgeschaltet ist und von dem Kristall zu durchlaufen ist, bis das eigentliche Bauteil im Bereich 14 vom wachsenden Kristall erreicht ist.

Die Gießform der Formschale 1 ist auf ihrer Innenseite so ausgestaltet, daß eine Keimbildung zwischen dieser Innenseite und der Schmelze verhindert wird. Hierzu besteht die Innenseite vorzugsweise aus einer Mischung aus Al₂O₃ und B₂O₃.

Der Temperaturgradient der Schmelze 14 beträgt je nach Legierung während der Unterkühlung vorzugsweise zwischen 0,0 und 10 K/cm. Der Punkt der größten Unterkühlung ist an einem Ende des herzustellenden Bauteils angesiedelt, ohne daß dieser Punkt der höchsten erreichten Unterkühlung entsprechen muß. Er sollte jedoch direkt an der Grenzfläche zwischen Keramik und Schmelze 16 liegen. Der Keimbildungsvorgang kann durch Anstechen der Legierung mit einem arteigenen oder einem artfremden Keim ausgelöst werden. Wird die Schmelze mit einem arteigenen Keim angestochen, so besteht der Stift 12 aus demselben Material wie die Schmelze 14. Andernfalls wird eine andere Superlegierung mit einem höheren Schmelzpunkt gewählt. Auch eine gezielte Erschütterung oder abrupte Abkühlung der Schmelze kann die Keimbildung anregen. Eine abrupte Erhöhung der Abkühlgeschwindigkeit kann z. B. dadurch erreicht werden, daß entweder der Wasserfluß durch eine Wasserkühlung im Block 8 erhöht wird oder daß die Gießform 1 aus dem Heizraum herausgezogen wird. Die Dicke des Blocks 8 ist maßgeblich für die Abkühlstärke, d. h. bei geeigneter Wahl dieser Dicke können unterschiedlich hohe Temperaturgradienten eingestellt werden. Als Legierungen werden vorzugsweise solche verwendet, die keine heterogene Keimbildung vorzeitig auslösen können, z. B. durch Lieferung von Fremdteilchen, die durch Reaktionen in der Schmelze oder aus in der Schmelze verteilten feinen Dispersionen entstehen. Um die Schmelze vor dem Eingießen in die Gießform keimarm zu machen, wird sie mit einer B₂O₃-Schlacke in Kontakt gebracht und einige Male mit einer Temperatur von über 1500°C erhitzt.

Für die Herstellung sehr großer Bauteile, wie z. B. Gasturbinenschaufeln für stationäre Gasturbinen mit einer Länge von > 500 mm, kann zur Aufrechterhaltung des vertikalen Temperaturgradienten über die gesamte Länge während der Rekaleszenzphase das Bauteil auch mit entsprechender Geschwindigkeit aus der Heizzone herausgezogen werden. Ein Baffle ist jedoch auch hier nicht nötig, weil der Vorgang in Sekunden und damit vergleichsweise schnell abläuft.

In der Fig. 3 ist eine Variante der Vorrichtung gemäß Fig. 1 dargestellt, bei welcher statt einer induktiven Heizung eine Widerstandsheizung vorgesehen ist. Eine derartige Widerstandsheizung ist beispielsweise aus der Fig. 1 der DE-OS 37 16 145 bekannt. Die Widerstandsheizung besteht hierbei aus drei zylindermantelförmigen Graphitheizelementen 30, 31, 32, deren elektrische Anschlüsse nicht dargestellt sind. Über diese Heizelemente wird die Schmelze 14 direkt erhitzt.

Die Fig. 4 zeigt in stark schematisierter Form einen Traubenaufbau von zwei Vorrichtungen gemäß Fig. 1 und 3. Mit 40 ist hierbei eine Kühlplatte bezeichnet, auf der zwei Behälter 41, 42 für flüssige Metall-Legierungen angeordnet sind. Diese Behälter 41, 42 sind über jeweils einen helixförmigen Selektor 43, 44 mit einer Gießform 45, 46 verbunden, welche die innere Kontur einer Turbinenschaufel aufweist. Im oberen Bereich der Gießformen 45, 46 sind Filtervorrichtung 47, 48 vorgesehen.

DE 42 09 227 C1

7

durch welche eine Metall-Legierung in die Gießformen 45, 46 eingegeben wird. Diese Metall-Legierung wird über einen Einfüll-Trichter 49 und Einfüllstutzen 50, 51 auf die Filtervorrichtungen 47, 48 gegeben. Zur Abstützung des Einfüll-Trichters 49 ist eine Säule 52 vorgesehen.

Das in der Fig. 4 gezeigte Prinzip der Anordnung von zwei Selektoren 43, 44 kann auch auf die Vorrichtungen der Fig. 1 und 2 übertragen werden. In einem solchen Fall sind zwischen den Bereichen 15 und 16 zwei helixförmige Selektoren vorgesehen. Durch eine solche Anordnung wird die Ausbeute an <100> orientierten Kristallen wesentlich erhöht.

Patentansprüche

1. Verfahren zur Herstellung von Bauteilen aus Superlegierungen, bei dem

- eine flüssige Metall-Legierung in einer Gießform oder Formschale für ein Bauteil erzeugt oder von außen in diese Gießform bzw. Formschale eingebracht wird;
- die flüssige Metall-Legierung durch progressive Abkühlung in einen metastabilen unterkühlten Zustand gebracht wird, wobei eine Stelle festgelegt wird, an der die größte Unterkühlung auftritt;
- der metastabile Zustand der unterkühlten flüssigen Metall-Legierung an der Stelle mit der größten Unterkühlung zerstört wird, so daß sich die flüssige Metall-Legierung verfestigt und eine dendritische Kristallstruktur ausbildet.

dadurch gekennzeichnet, daß die dendritische Kristallstruktur als Einkristall von der Stelle der stärksten Unterkühlung über einen Selektor in die flüssige Metall-Legierung überführt wird, die sich in der Formschale befindet.

2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die Schmelze um 30 K bis 70 K unterkühlt wird, um einen metastabilen Zustand zu erreichen.

3. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß vor der Rekaleszenzphase mit einer Abkühlgeschwindigkeit zwischen 11 K/min und 17 K/min abgekühlt wird.

4. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß der Temperaturgradient entlang der vertikalen Achse der Formschale (1) zwischen 0,0 K/cm und 4,2 K/cm beträgt.

5. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß in der Postrekaleszenzphase mit einer Abkühlgeschwindigkeit zwischen 9 K/min und 14 K/min abgekühlt wird.

6. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die Steuerung der von der Stelle der stärksten Unterkühlung nach oben wandernden Dendritenspitze derart erfolgt, daß sie vor ihrem Wiederaufschmelzen, welches durch die Abgabe von Erstarrungswasser bewirkt werden kann, den größtmöglichen Abstand von der Keimstelle erreicht hat.

7. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die Ausbildung der dendritischen Kristallstruktur durch Anstecken der unterkühlten Schmelze mit einem Keim erfolgt, der aus demselben Material wie die Schmelze besteht.

8. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet,

8

daß die Ausbildung der dendritischen Kristallstruktur durch Anstecken der unterkühlten Schmelze mit einem Keim erfolgt, der aus einem anderen Material wie die Schmelze besteht.

9. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die Ausbildung der dendritischen Kristallstruktur durch eine Erschütterung der Formschale (1) initiiert wird.

10. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die Ausbildung der dendritischen Kristallstruktur durch abrupte Erhöhung der Abkühlgeschwindigkeit initiiert wird.

11. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß eine keimarme Legierungsschmelze hergestellt und anschließend in die Formschale (1) eingebracht wird.

12. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die Stelle der größten Unterkühlung auf den untersten Punkt der flüssigen Metall-Legierung gelegt wird.

13. Vorrichtung für die Herstellung von Bauteilen aus Superlegierungen, mit

- einer Gießform (1), in welche eine Metall-Legierung erschmolzen oder von außen als Flüssigkeit eingegeben wird;
- einer Einrichtung (7, 8) für die kontrollierte Erzeugung einer bestimmten Temperatur oder eines Temperaturgefälles der flüssigen Metall-Legierung entlang wenigstens einer Achse der Gießform;
- einer Einrichtung (12) für den Eingriff in die flüssige Metall-Legierung;

gekennzeichnet durch

- einen durch Wandungen begrenzten Unterkühlraum (26), in dem die flüssige Metall-Legierung auf ihre stärkste Unterkühlung gebracht wird;
- einen Selektor (17) mit engem Querschnitt, der die Gießform (1) mit dem Unterkühlraum (26) verbindet.

14. Vorrichtung nach Anspruch 13, dadurch gekennzeichnet, daß der Unterkühlraum (26) auf einer kühlbaren Platte (8) angeordnet ist.

15. Vorrichtung nach Anspruch 13, dadurch gekennzeichnet, daß der Selektor (17) eine hohle Spirale ist.

16. Vorrichtung nach Anspruch 15, dadurch gekennzeichnet, daß der innere Durchmesser der Spirale (17) etwa 3 bis 10 mm beträgt.

17. Vorrichtung nach Anspruch 13, dadurch gekennzeichnet, daß die Einrichtung für die kontrollierte Erzeugung einer bestimmten Temperatur eine Induktionsspule (7) ist.

18. Vorrichtung nach Anspruch 17, dadurch gekennzeichnet, daß die Induktionsspule aus voneinander getrennten Einzelspulen besteht.

19. Vorrichtung nach Anspruch 15, dadurch gekennzeichnet, daß die Einrichtung für die kontrollierte Erzeugung eines Temperaturgradienten eine Isolierung ist, die an der Formschale (1) angebracht wird.

20. Vorrichtung nach Anspruch 13, dadurch gekennzeichnet, daß eine Verschiebevorrichtung vorgesehen ist, welche die relative Lage zwischen dem zu gießenden Bauteil und der Heiz- oder Isolierzonen verändert, so daß im Starterbereich ein hoher Temperaturgradient während der Rekaleszenzphase eingestellt wird.

DE 42 09 227 C1

9

10

21. Vorrichtung nach Anspruch 13, dadurch gekennzeichnet, daß die Einrichtung für die kontrollierte Erzeugung einer bestimmten Temperatur mehrere Widerstandsheizelemente (30 bis 32) aufweist, deren Leistung getrennt einstellbar ist.

5

22. Vorrichtung nach Anspruch 13, dadurch gekennzeichnet, daß die Gießform oder Formschale (1) wenigstens auf ihrer Innenseite aus einer Mischung aus Al_2O_3 und B_2O_3 besteht.

10

Hierzu 4 Seite(n) Zeichnungen

15

20

25

30

35

40

45

50

55

60

65

ZEICHNUNGEN SEITE 1

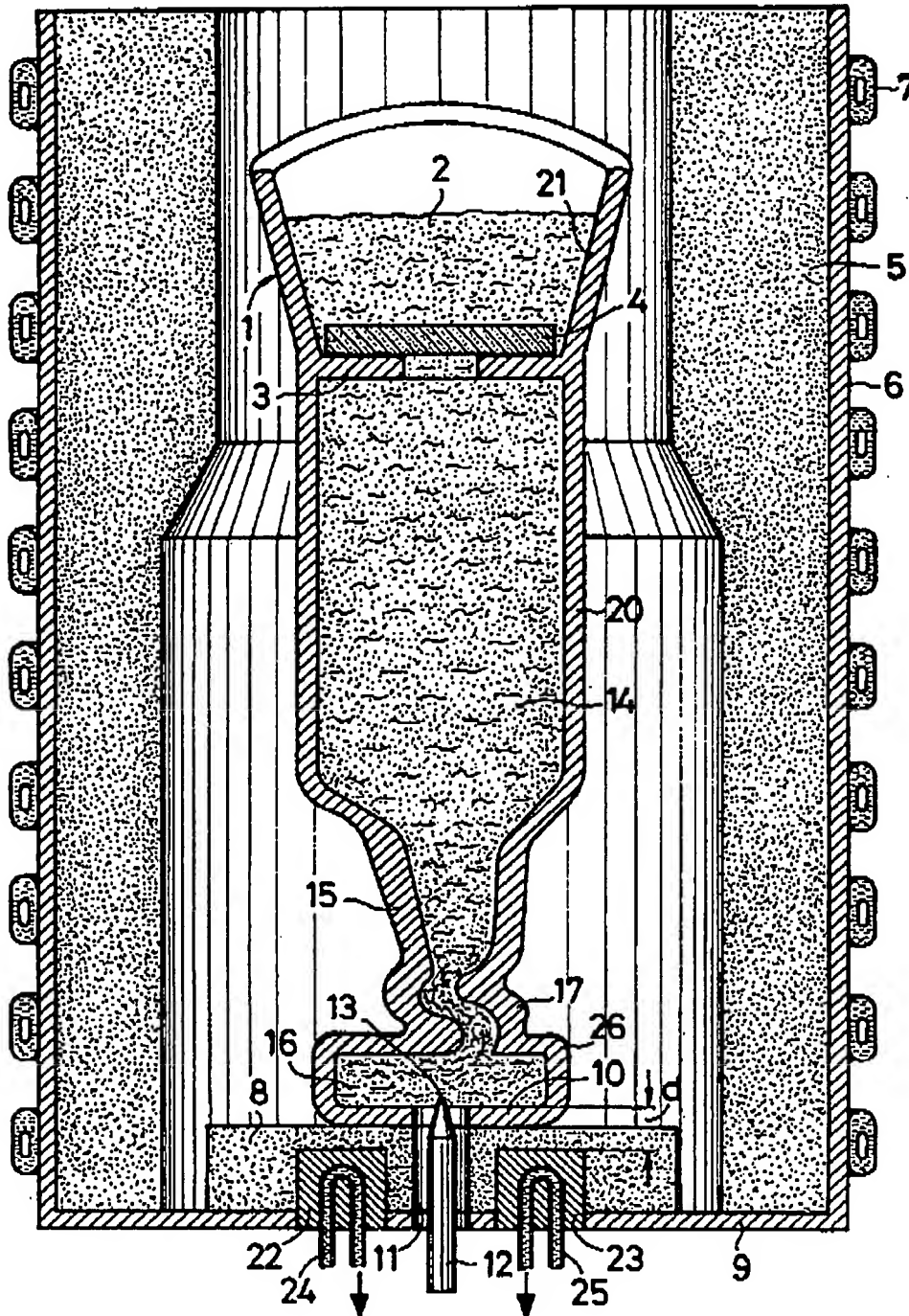
Nummer:

DE 42 09 227 C1

Int. Cl. 5:

B 22 D 27/04

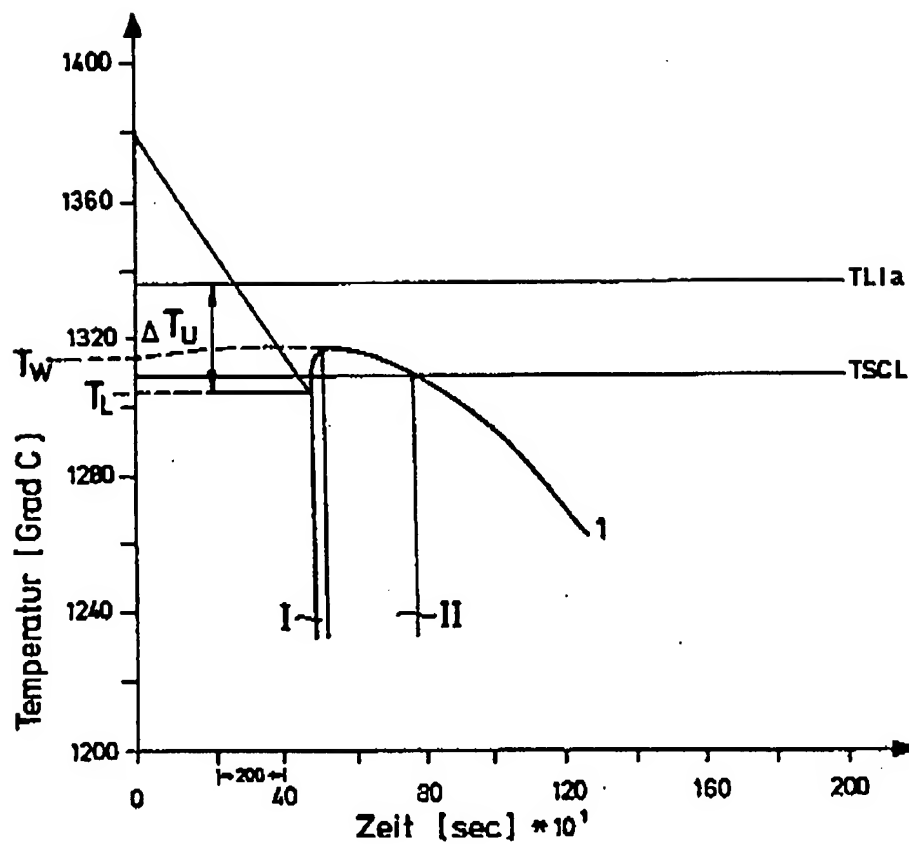
Veröffentlichungstag: 6. Mai 1993

**FIG. 1**

308 118/327

ZEICHNUNGEN SEITE 2

Nummer: DE 42 09 227 C1
Int. Cl.⁵: B 22 D 27/04
Veröffentlichungstag: 6. Mai 1993

**FIG. 2**

308 118/327

ZEICHNUNGEN SEITE 3

Nummer:

Int. Cl.⁵:

Veröffentlichungstag:

DE 42 09 227 C1

B 22 D 27/04

6. Mai 1993

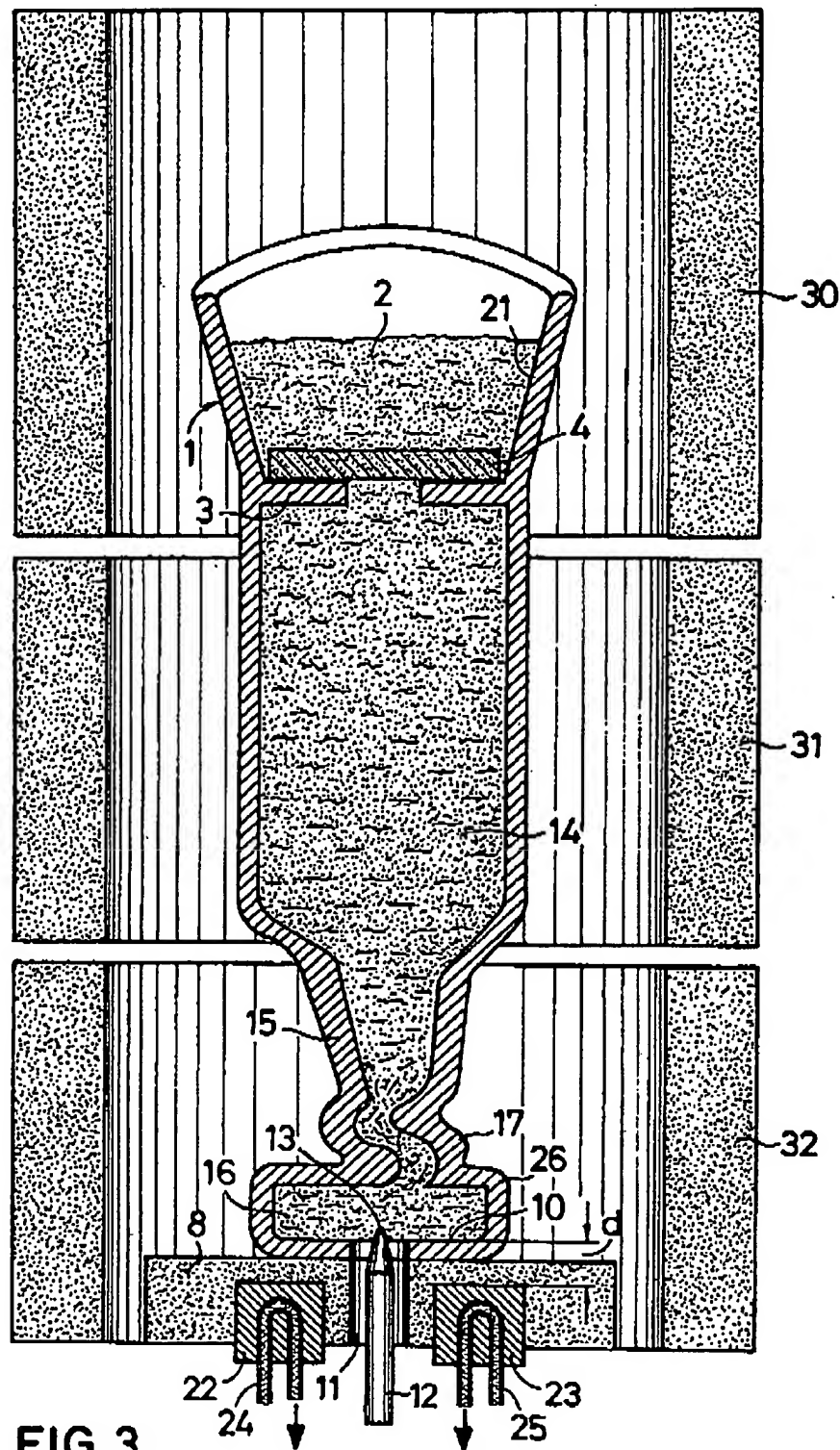
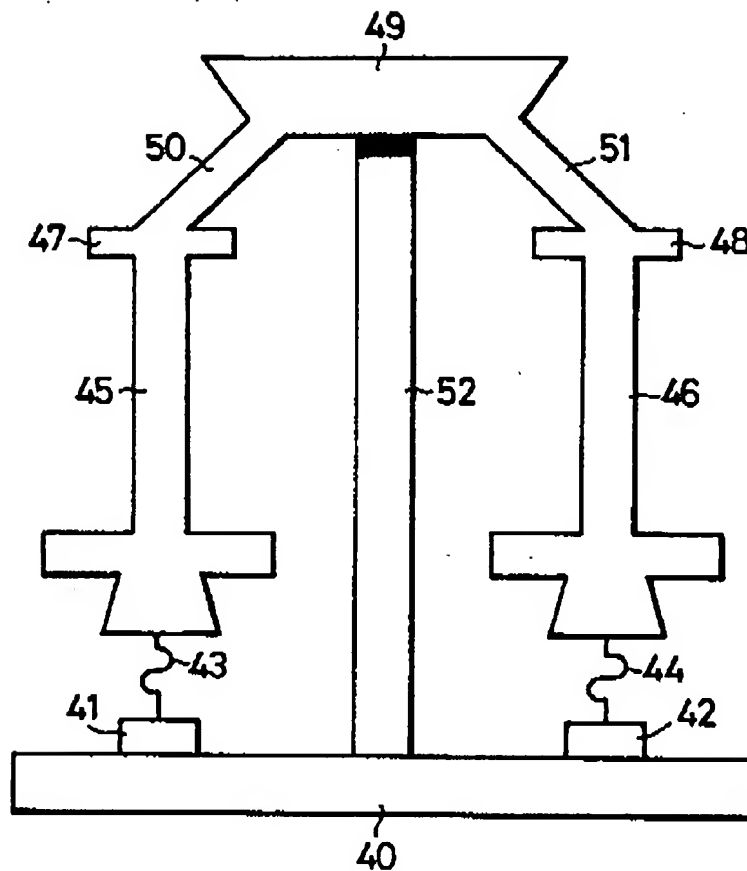


FIG. 3

308 118/327

ZEICHNUNGEN SEITE 4

Nummer: DE 42 05 227 C1
Int. Cl.⁵: B 22 D 27/04
Veröffentlichungstag: 6. Mai 1993

**FIG. 4**

308 118/327